

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ГВИНТА ГРАНУЛЯТОРА КОРМІВ

В. Братішко, к. т. н.

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»

Постановка проблеми. Одним із шляхів забезпечення ефективного виконання робочих процесів гвинтовими машинами є застосування таких геометричних параметрів робочих органів [1], які б відповідно до фізико-механічних властивостей технологічного матеріалу та умов процесу забезпечували його високу продуктивність і низькі питомі енерговитрати.

Найбільшого поширення у кормовиробництві набули гвинтові машини (екструдери та гранулятори) з циліндричним корпусом (робочою камерою) та гвинтом, параметри ширини й висоти каналу якого залежать від його довжини. Така конструкція зумовлена технічними можливостями сучасного машинобудування: програми керування автоматизованих верстатів базуються на нормах стандарту [2], що передбачають лінійну залежність подачі заготовки або інструмента від часу або встановлених обертів. При цьому питання оптимізації конструкційних параметрів гвинтів змінної геометрії залишаються недостатньо дослідженими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У переважній більшості досліджень [3–5], присвячених аналізу роботи гвинтових пресів, продуктивність останніх визначається методом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса для умов руху пластифікованої маси з властивостями ньютонівської рідини:

$$Q = \frac{V_z WH}{2} + \frac{WH^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial l}, \quad (1)$$

де V_z – швидкість руху маси вздовж осі каналу гвинта, м/с; η – в'язкість маси, Па·с; $\partial p/\partial l$ – градієнт тиску за довжиною каналу гвинта, Па/м.

Проте, за твердженням [6], залежність (1) через наявність припущень та спрощень під час її отримання не може бути використана у наведеному вигляді в проектуванні нових машин без застосування низки емпіричних коефіцієнтів. До того ж очевидно, що ця залежність не може застосовуватися для гвинтових машин зі змінними геометричними параметрами гвинтів.

На основі розв'язання рівняння Нав'є-Стокса для умов ньютонівської в'язкої рідини нами було отримано [7] вираз продуктивності гранулятора кормів з гвинтом, геометричні параметри якого змінюються за його довжиною:

$$Q = \frac{\pi D n (W_0 - k_w l) (H_0 - k_H l)}{2 \sqrt{1 + \frac{(W_0 - k_w l - t)^2}{\pi^2 D^2}}} + \frac{(W_0 - k_w l) (H_0 - k_H l)^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (2)$$

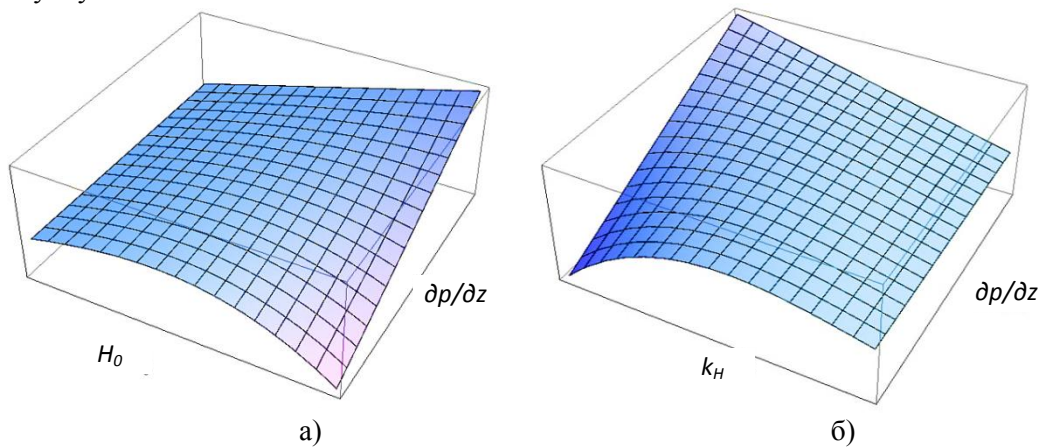
де W_0 – початкове значення ширини каналу гвинта, м; H_0 – початкове значення глибини каналу гвинта, м; k_W – коефіцієнт зміни ширини каналу гвинта за довжиною гвинта; k_H – коефіцієнт зміни глибини каналу гвинта за довжиною гвинта; l – довжина гвинта, м; D – зовнішній діаметр гвинта, м; t – ширина витка гвинта, м; n – частота обертання гвинта, с^{-1} ; $\partial p/\partial z$ – градієнт тиску у каналі гвинта, Па/м; η – в'язкість пластифікованої кормосуміші, Па·с.

Отримана залежність (2) дозволяє проаналізувати продуктивність гвинта гранулятора як суму двох складових: вимушеного потоку, що за своєю суттю є продуктивністю гвинта за умови відсутності пристрою для формування матеріалу і відсутності проковзування матеріалу, та протитоку, викликаного наявністю формувального пристрою – матриці гранулятора.

Постановка завдання. Метою досліджень є оптимізація конструкційних параметрів гвинта гранулятора кормів за критерієм максимальної продуктивності.

Виклад основного матеріалу. Отримане рівняння продуктивності гвинта гранулятора (2) дає змогу здійснити оптимізацію його геометричних параметрів. Для цього дослідимо це рівняння на екстремуми.

Здійснимо графічний аналіз функції (2) відносно таких геометричних параметрів: H_0 , k_H , W_0 , k_W , l , D залежно від градієнта тиску ($\text{Grad } p = \partial p/\partial z$) у каналі гвинта гранулятора. Характер зміни функції Q від цих аргументів наведено на рисунку.



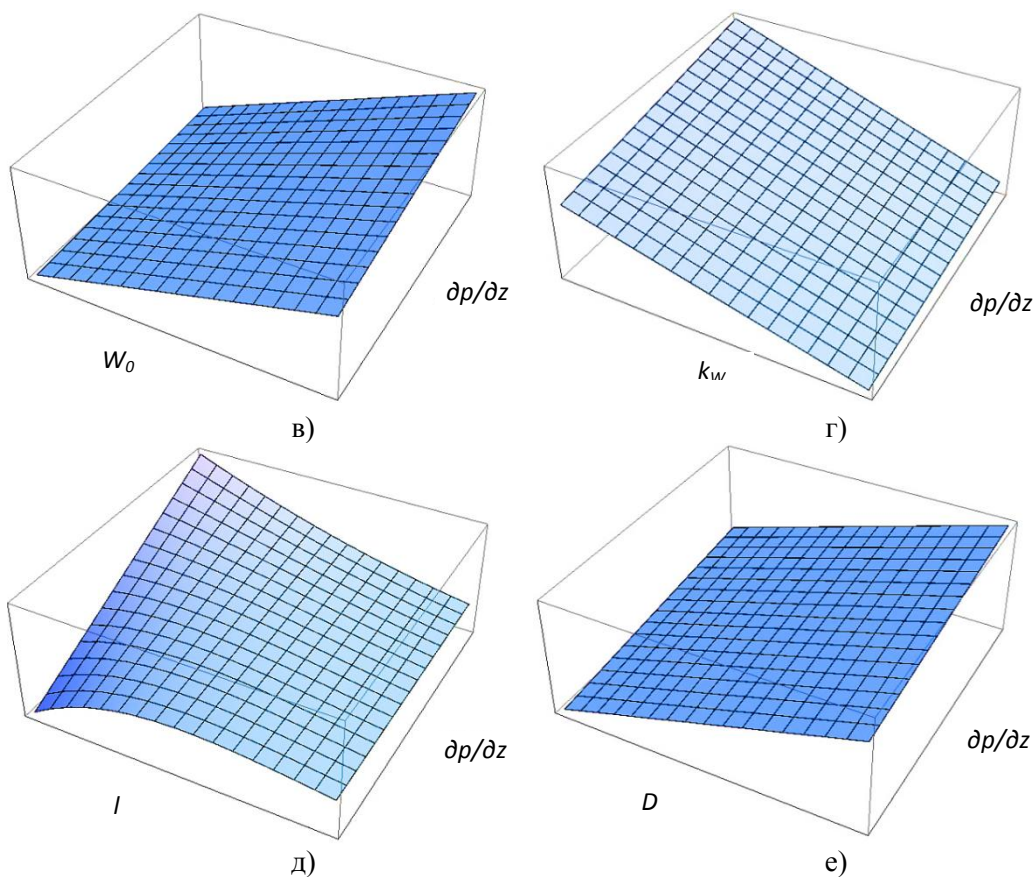


Рис. Вплив геометричних параметрів гвинта гранулятора кормів на його продуктивність.

Як видно з аналізу рисунка, функція продуктивності гвинта гранулятора (2) залежно від значення градієнта тиску в каналі гвинта має екстремуми (поверхні а, б та д) для таких аргументів: H_0 , k_H та l (необхідною умовою для наявності екстремуму за параметром l є випадок $k_H > 0$). Відносно аргументів W_0 , k_w , D , а також відносно аргументу t залежність (2) екстремумів не має.

Отже, можемо зробити висновок про наявність деяких оптимальних значень параметрів глибини каналу H_0 , коефіцієнта зміни глибини каналу k_H та довжини гвинта l .

Оптимальну глибину каналу гвинта знайдемо, прирівнявши до нуля часткову похідну функції продуктивності за цим аргументом:

$$\frac{\partial Q}{\partial H_0} = 0. \quad (3)$$

Взявши за аналогію наведені у [8] результати досліджень з оптимізації транспортування розплаву полімерів при гвинтовій екструзії, прийmemo припущення, що відношення $\partial p/\partial z = \text{const}$ є від'ємним, а приріст тиску відбувається в межах від 0 до p на довжині гвинта гранулятора. З огляду на це, запишемо рівняння (3) у вигляді:

$$(W_0 - k_W l) \left(\frac{\pi D n}{2 \sqrt{1 + \frac{(W_0 - k_W l - t)^2}{\pi^2 D^2}}} - \frac{(H_0 - k_H l)^2}{12 \eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{(W_0 - k_W l)(H_0 - k_H l)^2}{6 \eta} \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Розв'язуючи рівняння (4) відносно H_0 , запишемо вираз оптимальної глибини каналу гвинта:

$$H_0^{opt} = k_H l + \frac{\pi \sqrt{2 D n \eta}}{\sqrt{\frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{\pi^2 D^2 + (W_0 - k_W l - t)^2}{D^2} \right)^{\frac{1}{4}}}}. \quad (5)$$

Оптимальне значення коефіцієнта зміни глибини каналу k_H знайдемо, розв'язуючи рівняння:

$$\frac{\partial Q}{\partial k_H} = 0. \quad (6)$$

За умови прийнятих вище припущень ліва частина залежності (6) запишеться так:

$$-l(W_0 - k_W l) \left(\frac{\pi D n}{2 \sqrt{1 + \frac{(W_0 - k_W l - t)^2}{\pi^2 D^2}}} - \frac{(H_0 - k_H l)^2}{12 \eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{l(W_0 - k_W l)(H_0 - k_H l)^2}{6 \eta} \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Розв'язання рівняння (7) відносно k_H дає змогу отримати залежність, тотожну залежності (5):

$$k_H^{opt} = \frac{1}{l} \left(H_0 - \frac{\pi \sqrt{2Dn\eta}}{\sqrt{\frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{\pi^2 D^2 + (W_0 - k_W l - t)^2}{D^2} \right)^{\frac{1}{4}}}} \right). \quad (8)$$

Для знаходження виразу оптимальної довжини гвинта запишемо:

$$\frac{\partial Q}{\partial l} = 0. \quad (9)$$

Після диференціювання рівняння (9) набуде вигляду:

$$(H_0 - k_H l)(W_0 - k_W l) \left(\frac{k_W n(W_0 - k_W l - t)}{2\pi D \left(1 + \frac{(W_0 - k_W l - t)^2}{\pi^2 D^2} \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{k_H (H_0 - k_H l) \frac{\partial p}{\partial z}}{6\eta} \right) - [k_W (H_0 - k_H l) + k_H (W_0 - k_W l)] \left(\frac{\pi D n}{2 \sqrt{1 + \frac{(W_0 - k_W l - t)^2}{\pi^2 D^2}}} - \frac{(H_0 - k_H l)^2 \frac{\partial p}{\partial z}}{12\eta} \right) = 0. \quad (10)$$

Через наявність рекурсії залежність (10) неможливо розв'язати в натуральному вигляді, проте вона може бути використана для числового розв'язання задачі щодо пошуку оптимальної довжини гвинта для конкретної конструкції гранулятора кормів.

Однак аналіз наявних конструкцій робочих органів гвинтових машин, у більшості з яких значення параметра ширини каналу не перевищує діаметра гвинта, тобто $W_0 \leq D$, дозволяє зробити припущення, що складову залежності (10) можна записати так:

$$\sqrt{1 + \frac{(W_0 - k_W l - t)^2}{\pi^2 D^2}} \approx \sqrt{1 + \frac{(D - t)^2}{\pi^2 D^2}} \approx 1. \quad (11)$$

Тоді рівняння (9) можна записати таким чином:

$$- [k_W (H_0 - k_H l) + k_H (W_0 - k_W l)] \left(\frac{\pi D n}{2} - \frac{(H_0 - k_H l)^2}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{k_H (W_0 - k_W l) (H_0 - k_H l)^2}{6\eta} \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (12)$$

Розв'язуючи рівняння (12) відносно довжини гвинта l , запишемо вираз оптимальної довжини гвинта гранулятора:

$$l^{opt} = \frac{1}{4 \frac{\partial p}{\partial z} k_H^3 k_W (A_l + 4\sqrt{2\pi B_l})^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 H_0^2 k_H^4 k_W^2 - 2 \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 H_0 k_H^5 k_W W_0 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 k_H^6 W_0^2 + 16 \frac{\partial p}{\partial z} D k_H^4 k_W^2 n \pi \eta + 3 \frac{\partial p}{\partial z} H_0 k_H^2 k_W (A_l + 4\sqrt{2\pi B_l})^{\frac{1}{3}} + \right. \quad (13) \\ \left. + \frac{\partial p}{\partial z} k_H^3 W_0 (A_l + 4\sqrt{2\pi B_l})^{\frac{1}{3}} + \left(\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 k_H^6 (W_0 k_H - H_0 k_W)^3 + \right. \right. \\ \left. \left. + 24 \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 D k_H^6 k_W^2 n \pi \eta (H_0 k_W - W_0 k_H) + 4\sqrt{2\pi B_l} \right)^{\frac{2}{3}} \right],$$

де складові залежності (13) A_l та B_l являють собою вирази:

$$A_l = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 k_H^6 (W_0 k_H - H_0 k_W)^3 + 24 \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 D n \pi \eta k_H^6 k_W^2 (H_0 k_W - W_0 k_H) \quad (14)$$

$$B_l = - \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 D n \eta k_H^{12} k_W^2 \left[3 \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 (H_0 k_W - W_0 k_H)^4 + \right. \quad (15) \\ \left. + 6 \frac{\partial p}{\partial z} D n \pi \eta (H_0 k_W - W_0 k_H)^2 + 128 D^2 k_W^4 n^2 \pi^2 \eta^2 \right].$$

Висновки. 1. У результаті аналізу функції продуктивності гвинта гранулятора кормів залежно від градієнта тиску у каналі гвинта було встановлено, що вона має екстремуми для таких аргументів, як початкова глибина каналу гвинта H_0 , довжина гвинта l та коефіцієнт зміни глибини каналу гвинта за його довжиною k_H , причому необхідною умовою для наявності екстремуму за параметром l є випадок $k_H > 0$.

2. Із застосуванням методу аналізу функції на екстремуми для умов максимальної продуктивності гвинта гранулятора кормів отримано вирази оптимальної початкової глибини каналу гвинта, коефіцієнта зміни глибини каналу гвинта та довжини гвинта.

Бібліографічний список

1. Extrusion-Cooking Techniques: Applications, Theory and Sustainability / [edited by Leszek Moscicki]. – Weinheim : WILEY-VCH, 2011. – 234 p.

2. Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ : ГОСТ 20999-83. – [Введ. 1984-07-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 28 с.
3. Gale M. Mixing in single screw extrusion / Martin Gale. – Shrewsbury : Smithers Rapra, 2009. – 286 p.
4. Машины и аппараты пищевых производств : в 2 кн. Кн. 1 / [С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков и др.] ; под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. – М. : Высш. шк., 2001. – 703 с.
5. Handbook of Food Engineering / edited by Dennis R. Heldman and Daryl B. Lund. – Second edition. – CRC Press, 2007. – 1040 p.
6. Zeki Berk. Food process engineering and technology / Zeki Berk. – Burlington : Elsevier, 2009. – 605 p.
7. Братішко В. В. Швидкість руху кормосуміші та продуктивність гвинтового гранулятора кормів зі змінними геометричними параметрами гвинта / В. В. Братішко // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки : матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. – Кіровоград : КНТУ, 2013 – Вип. 1. – С. 145-147.
8. Раувендааль К. Экструзия полимеров / К. Раувендааль // пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. – СПб. : Профессия, 2008 – 768 с.

Братішко В. Оптимізація конструкційних параметрів гвинта гранулятора кормів

Наведено результати теоретичних досліджень, присвячених оптимізації конструкційних параметрів гранулятора кормів зі змінними геометричними параметрами гвинта за його довжиною. За умови забезпечення максимальної продуктивності отримано вирази оптимальної довжини гвинта, початкової глибини каналу та коефіцієнта зміни глибини каналу гвинта за його довжиною.

Ключові слова: гвинт, гранулятор, кормосуміш, оптимізація, продуктивність, екстремум.

Bratishko V. Optimization of structural parameters of feed screw pellet mill

In this article shows the results of theoretical studies for optimize of pellet mill structural parameters with variable feed screw geometries depending on its length. Expressions optimal screw length, the screw channel depth of starting coefficient and a screw channel depth changes depending on the length obtained for the condition of maximum productivity.

Key words: extremum, feed mixture, optimization, pellet mill, productivity, screw.

Братишко В. Оптимизация конструкционных параметров винта гранулятора кормов

Приведены результаты теоретических исследований, посвященных оптимизации конструктивных параметров гранулятора кормов с переменными геометрическими параметрами винта в зависимости от его длины. При условии обеспечения максимальной производительности получены выражения оптимальной длины винта, начальной глубины канала и коэффициента изменения глубины канала винта в зависимости от его длины.

Ключевые слова: винт, гранулятор, кормосмесь, оптимизация, производительность, экстремум.